

論文 可視化モデルによる高流動コンクリートの間隙通過性に関する考察

吳 相均^{*1} • 野口貴文^{*2} • 友澤史紀^{*3}

要旨: 本研究では、単純化したフレッシュコンクリートの可視化モデルと試作した可視化モデル用間隙通過性試験装置を用いて、間隙通過時の流体中の骨材の動きを録画するとともに、間隙に作用する荷重の変化を測定した。録画された動画は画像解析装置を用いて処理され、間隙通過時のコンクリートの流動速度低下現象、閉塞現象などの解明に用いられた。その結果、骨材の間隙通過前後の流動速度の変化および閉塞現象などと間隙に作用する荷重との関係が明らかになり、固液二相流体の間隙通過挙動をレオロジー的に評価する上での基礎資料が得られた。

キーワード: 間隙通過性、高流動コンクリート、レオロジー、可視化モデル、画像解析

1. はじめに

著者らは、モルタルおよびコンクリートの間隙通過時のビンガム定数の見かけ上の変化を求めるために、格子が移動するタイプの間隙通過性試験装置を用いて実験的な研究を行った[1]。そこでは、流動曲線を求める際に、棒状体に拡張したAnsley式を用い、鉄筋格子の移動速度に基づいて間隙通過時のひずみ速度を算出した。しかし、間隙通過時のフレッシュコンクリートの挙動を微視的に考えると、ひずみ速度は流動断面積の減少によって速くなるはずである。すなわち、流体の移動速度から直接ひずみ速度を導き出し、ビンガム定数の見かけ上の増加現象を説明すべきであると考えられる。流体の移動速度は、モルタルと粗骨材が分離していない状態であれば、粗骨材の移動速度から求めることができる。従って、フレッシュコンクリート中を動く骨材の挙動を観察する必要があり、そのためには、フレッシュコンクリートを可視化することが有効であると考えられる。

本研究では、単純化したフレッシュコンクリートの可視化モデルと試作した可視化モデル用間隙通過性試験装置を用いて、間隙通過時の流体中の骨材の動きを録画するとともに、間隙に作用する荷重の変化を測定した。録画された動画は画像解析装置を用いて処理され、間隙通過時のコンクリートの流動速度低下現象、閉塞現象などの解明に用いられた。

2. 高流動コンクリートの可視化モデル

流体の可視化は、流れの現象を理解するのに最適な手段であると考えられ、管内閉塞現象などのメカニズムを解明する目的で、フレッシュコンクリートの可視化モデルが実験手段として開発された[2, 3]。本研究では、高流動コンクリートを連続相（モルタル）と分散相（粗骨材）からなる二相材料と考え、細骨材を省略するとともに粗骨材の粒径も一定の寸法に固定して、単純化した高流動コンクリートの可視化モデルを製造した。高流動コンクリートの可視化モデルのモルタル部は、スターチポリアクリレートからなる白色粉末状の高吸水性樹脂を水道水に微量添加することにより粘性を調節し、

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻、工修（正会員）

*2 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻、博士（工学）（正会員）

*3 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻、工博（正会員）

実際の高流動コンクリートのモルタル部に近いレオロジー特性をもつようにした。高吸水性樹脂は、透明度が高く、かつ粘性を有する他のモデル材料と比較して温度や湿度などの外的環境による経時的な品質変化が全くなく、安定した材料であることから、モルタルモデルとして適切な材料と判断される。粗骨材は、実際のフレッシュコンクリートにおけるモルタルと粗骨材の比重差が、通常の調合であれば0.3程度であることを考慮するとともに、画像解析に便利な形態とするため、ポリウレタン樹脂製の直径17mm（比重：1.27）の球とした。

3. 実験概要

3.1 使用材料および調合

本実験に使用した材料およびその調合をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。粗骨材モデルの容積比は、実験が2次元変形モデルであることと完全には閉塞してしまわないことを考慮し、10%に決定した。

表-1 使用材料

種類	材料
モルタルモデル	高吸水性樹脂(比重1.0)
粗骨材モデル	ポリウレタン樹脂(比重1.27)

表-2 可視化モデルの調合

粗骨材容積比 (%)	絶対重量 (kg/m ³)			絶対容積 (l/m ³)		
	水	樹脂	粗骨材	水	樹脂	粗骨材
10	895.2	4.8	127	895.4	4.8	100

3.2 実験要因および水準

本実験では、間隙寸法およびコンクリートの流動速度がコンクリートの間隙通過挙動に及ぼす影響を調べるために、表-3 に示す実験要因および水準を設定した。また、本研究で用いる記号の説明を図-1 に表す。

表-3 実験要因および水準

実験要因	水準	記号
間隙通過性試験装置の間隙寸法 (mm)	25.0	G25
	32.0	G32
	42.5	G43
間隙なし		N
間隙移動速度 (cm/s)	0.5	L
	1.0	M
	1.5	H

G32-L

間隙の種類 間隙 移動 速 度

図-1 記号例

3.3 測定・観察項目およびその方法

(1) 測定項目

測定項目はモルタルモデルのフロー値、フロー時間およびレオロジー定数、ならびにコンクリートのレオロジー定数、間隙通過時の荷重および間隙移動速度であり、間隙の移動状況と粗骨材の挙動をビデオに記録した。

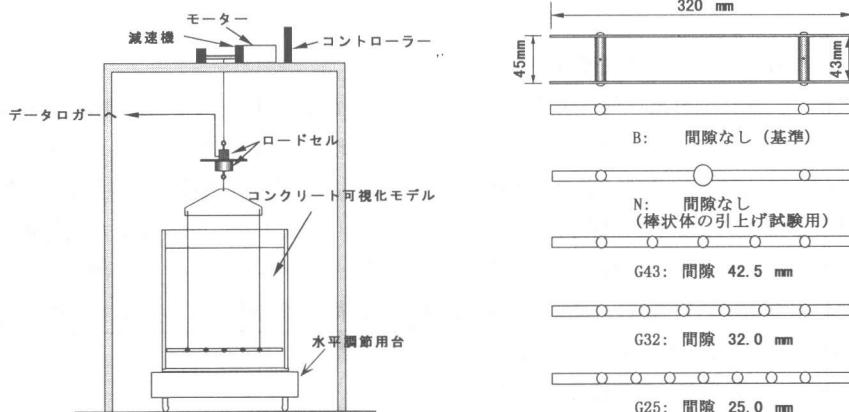


図-2 間隙通過性試験装置および間隙の種類

(2) モルタルの可視化モデル

所要量の白色微粉末状の高吸水性樹脂を水道水に混合し、粉末が溶解するまで攪拌してモルタルモデルを作製した。JIS R 5201 に定められたフローコーンを用いて落下運動を与えない状態でモルタルモデルのフロー試験を行い、モルタルモデルが静止するまでの広がり（フロー値）とフロー値が 20cm に到達するまでの時間（フロー時間）を計った。同時に内円板型回転粘度計によって、0.5、2.5、5、10、20、50 rpm の回転速度についてそれぞれ 60 秒ずつずり応力を測定し、直線回帰により降伏値および塑性粘度を求めた。得られたフロー値、フロー時間およびレオロジー特性は標準的な高流動コンクリートのモルタル部の特性であった。（フロー : 20.9 cm、塑性粘度 : 2.7 Pa · s、降伏値 : 6.6 Pa）

(3) 粗骨材の可視化モデル

ポリウレタン樹脂の A 液と B 液を重量比 1:2 に計り取り、素早く攪拌混合（約 10 秒間）し、直径が 17 mm の球形の型枠に注入した。その際、モルタルモデルとの比重差が、実際のモルタルと粗骨材の比重差と同程度になるように硝子のビーズを混入することにより骨材の比重を調整した。樹脂の注入後 90~140 秒間の反応を待ってから脱型した。モデル粗骨材は本来は透明な球体であるが、データ処理のために一部をアクリルウレタン樹脂塗料で黒く着色した。

(4) 可視化モデルの間隙通過性試験

試作した可視化モデル用間隙通過性試験装置（図-2）の間隙移動速度を変化させ、間隙部にかかる荷重を測定した。同時にビデオ撮影を行い、その映像を画像処理して、間隙部の速度と粗骨材モデルの移動速度から粗骨材の相対速度を求めた。得られた荷重と粗骨材モデルの相対速度を Ansley 式を発展させた式(1)および式(2)[2]に代入して、コンクリートモデルの間隙通過時の流动曲線を求めた。また、閉塞現象が生じる場合にはコンクリートモデル内部の様子を観察することにより、閉塞時の流动速度変化と荷重の変化を対比検討した。

$$\tau = \frac{F}{6\pi r \Sigma l} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{2r} \quad (2)$$

τ :せん断応力 (Pa)、 $\dot{\gamma}$:ひずみ速度 (1/s)、 F :荷重 (N)、 V :速度 (m/s)、 r :鉄筋の半径 (m)、 l :鉄筋の長さ (m)

(5) 画像分析方法

粗骨材の挙動を撮影した動画を一定時間間隔で画像ファイルとして取り込んだ後、それぞれの画像ファイルについて間隙部とい i 番目の粗骨材モデルの XY 座標系での座標 ($X_i(t), Y_i(t)$) を求め、粗骨材モデルの間隙部に対する相対座標 ($x_i(t), y_i(t)$) を式(3)、(4)のように計算した（図-3）。本実験では骨材の相対速度としては鉛直方向だけを考え、式(5)から相対速度 $Vy_i(t)$ を求めた。また、それぞれの間隙および引き上げ速度に対して、粗骨材モデル全て ($i=1, 2, 3 \dots n$) について骨材と間隙との相対距離 yi と骨材の相対速度 Vy_i のグラフを描き、間隙付近 ($y \approx 0$) における粗骨材の相対速度の分布について検討した。

$$x_i(t) = X_i(t) - X_0(t) = X_i(t) \quad (\because X_0(t) = 0) \quad (3)$$

$$y_i(t) = Y_i(t) - Y_0(t) \quad (4)$$

$$v_{y_i}(t + \frac{1}{2}\Delta t) = -\frac{y_i(t + \Delta t) - y_i(t)}{(t + \Delta t) - t} = -\frac{y_i(t + \Delta t) - y_i(t)}{\Delta t} \quad (5)$$

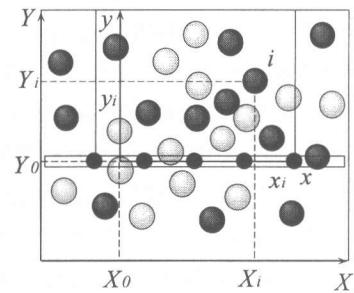


図-3 座標系

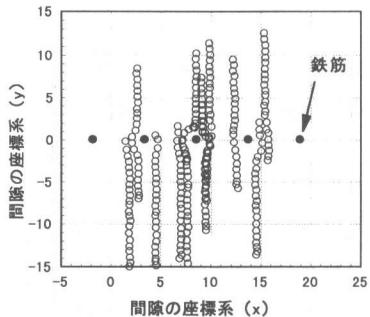


図-4 骨材の軌跡

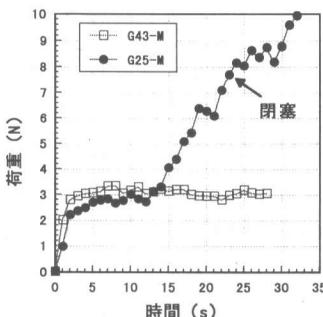


図-5 間隙部にかかる荷重

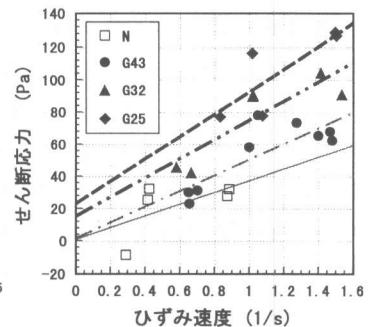


図-6 各間隙の流動曲線

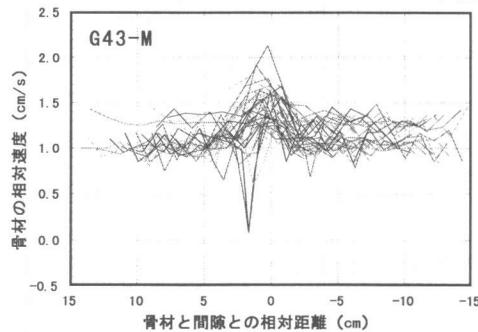
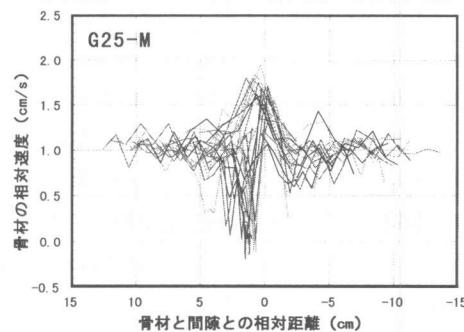


図-7 骨材と間隙との相対距離と骨材の相対速度との関係(G43-M、G25-M)



4. 実験結果および考察

4.1 流動曲線

図-4 は間隙通過時の骨材の軌跡を示す。縦軸 $y=0$ は間隙である鉄筋と骨材の距離が 0、すなわち骨材が鉄筋を通過する時を示す。また、 y が+の場合には骨材が間隙通過前であることを示し、-の場合には間隙通過後であることを示す。本実験では、骨材の分布が各実験ごとにばらつくことの影響を削減するため、引上げ試験は全て、同一条件下で 3 回以上繰り返し、得られた結果を平均した。間隙引上げ実験で得られた時間経過に伴う荷重の変化の一例を図-5 に示すが、閉塞が生じていない通常の場合と閉塞が生じ始めた場合の 2 種類の実験結果の違いがわかる。図のように G43-M の場合は閉塞を起こさず安定した荷重が得られた。それに対して G25-M では、G43-M と同一速度で間隙を移動させたにもかかわらず、間隙が狭いため閉塞が生じた。その場合、間隙まわりの流動が停止したため、得られた荷重値を式(1)に適用することはできず、降伏値は間隙部分の流体に生じるせん断応力よりもさらに大きくなっていると判断される[5]。閉塞が生じた場合以外の流動曲線を間隙寸法ごとに図-6 に示すが、流体の間隙通過時の挙動は巨視的には見かけ上のレオロジー特性の増大として解釈できる。見かけ上の塑性粘度の増加率は、間隙がない通常の場合(N)に比較すると、間隙 G43 で 1.34 倍、間隙 G32 で 1.64 倍、間隙 G25 で 1.91 倍に增加了。

4.2 骨材と間隙の距離と骨材の流動速度との関係

骨材の間隙への接近および通過に伴う骨材の相対速度の変化を図-7 に示す。骨材は間隙近傍で速度変化が生じており、間隙のない場合（骨材の相対速度は 1.0 cm/s 一定）とは違う挙動を示す。すなわち、骨材が間隙にある程度近づくと間隙の影響を受けて速度が減少し、間隙通過時には流動断面積の減少により流動速度は増加し、その後間隙からある程度離れたところで再び元の速度で安定した。

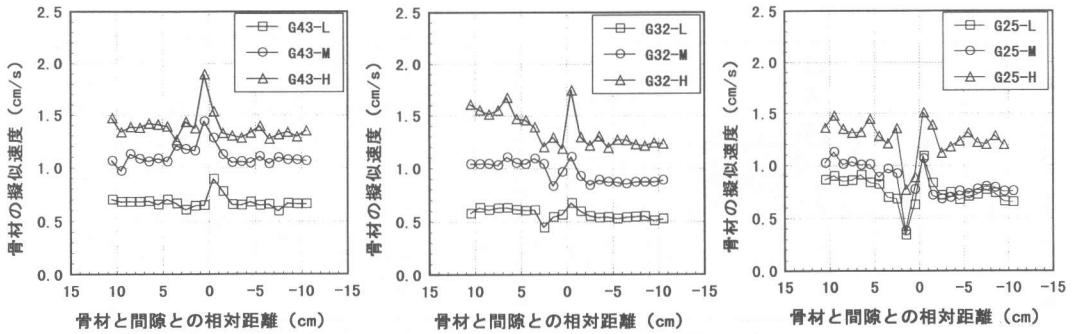


図-8 骨材と間隙との相対距離と骨材擬似速度との関係 (G43、G32、G25)

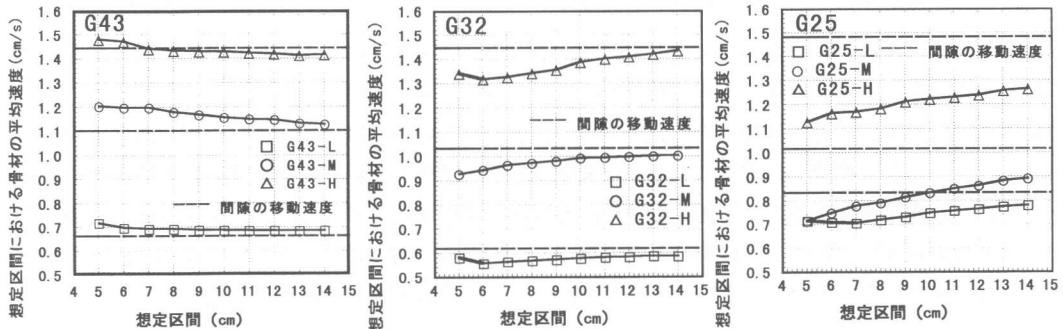


図-9 相対座標 $y=-3$ からの距離（想定区間）と想定区間における骨材の平均速度との関係

この間隙通過速度の増大は、間隙が狭くなるほど著しくなることが間隙移動速度が同一で間隙寸法が異なる場合の結果である図-7 の G43-M と G25-M を比較することからわかる。また、G25-M は閉塞を生じ始めた場合の骨材の速度変化を示しており、間隙への接近に伴って骨材の相対速度が 0 に近づきつつも、そのまま間隙を通過する骨材もあれば、閉塞して相対速度が 0 のままである骨材もある。このような全ての骨材の相対速度を平均化し、擬似的な平均相対速度 \bar{V}_a (式(6)、以下、擬似速度という)として表現したのが図-8 である。間隙通過後の擬似速度の算出に際しては、閉塞した骨材についても速度が 0 であるとして、擬似速度の算出に加味した。これは擬似速度が骨材の間隙通過率の概念を含んでいることを意味し、見かけ上のレオロジー定数の増大と解釈する巨視的な評価と同様に二相材料の間隙通過挙動を擬似速度という流動速度の概念のみで判断することができるといえる。

$$\bar{V}_a = \sum_{i=1}^N V_i / N \quad (6)$$

$$\bar{V}_d = \sum_{j=1}^n V_j / n \quad (7)$$

V_i 、 V_j ：相対速度、 N ：全骨材、 n ：想定区間の骨材

4.3 想定区間における骨材の相対速度

実験結果から骨材は間隙通過後、鉄筋直径の 3 倍程度離れた位置、すなわち相対座標 y が-3 の位置から速度が安定することがわかった。したがって、 $y=-3$ を基準位置として、正方向のある位置までの区間(想定区間)における骨材の平均相対速度 \bar{V}_d (式(7))、について考える。この平均相対速度が間隙引上げ速度に一致する場合には、間隙通過に伴う骨材どうしの干渉や閉塞は生じていないと判断され、平均速度が間隙引上げ速度より著しく低い場合には、流動が阻害されていると判断される。したがって、高流動コンクリートが型枠内を安定して流動するためには、骨材の平均速度が間隙移動

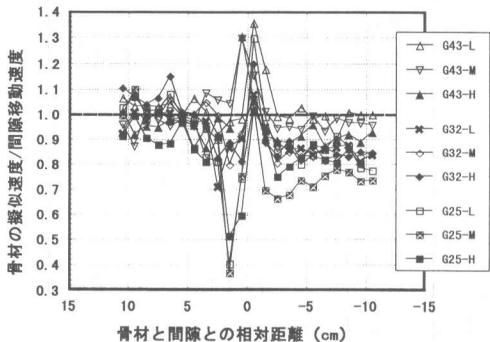


図-10 骨材の搬送速度に及ぼす間隙移動速度の影響

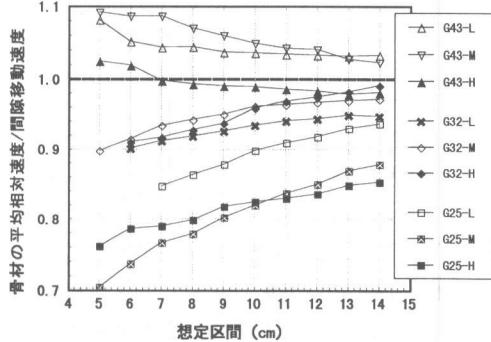


図-11 骨材の平均相対速度に及ぼす間隙移動速度の影響

速度と同等になるように鉄筋のあきとにピッチを設定する必要がある。図-9に想定区間とその区間における骨材の平均速度の関係を示す。間隙G43では、間隙通過前の速度減少があまり生じないため、流動断面積の減少による速度増大の影響が卓越し、想定区間の増加に伴い、骨材の平均速度は徐々に低下した。しかし、間隙G32およびG25では間隙通過前の速度低下が、間隙通過時の速度増加よりも大きいため、想定区間が小さい範囲では平均速度は間隙移動速度よりも小さく、想定区間の増加に伴い、間隙移動速度に接近する傾向を示した。以上のことから、間隙どうしある程度以上距離を確保する必要があり、その距離の設定によってコンクリートの流動挙動を把握することができ、施工性および閉塞の予測も可能であると考えられる。図-10および図-11は、図-8および図-9の縦軸を間隙移動速度で除したものであり、骨材の間隙通過挙動に及ぼす間隙移動速度の影響を把握することができる。図より、間隙移動速度が大きいほど骨材の速度が低下することがわかる。すなわち、実際の高流動コンクリートにおいても流動速度を大きくし過ぎると、すなわち、コンクリートの打込み速度を大きくし過ぎると、閉塞が生じやすくなることが予想される。

5.まとめ

本研究では、単純化した高流動コンクリートの可視化モデルを用いることにより、これまで不明であった間隙通過時のコンクリートの挙動を骨材の速度変化の観点から捉えることが可能となり、以下のような知見が得られた。

- 1) 間隙通過性試験の可視化により、間隙通過時の骨材の速度変化および閉塞現象などの挙動を直接観察できるようになり、それらの現象を微視的な観点から定量化することができるようになった。
- 2) 骨材は、間隙通過前後で速度変化を生じ、その変化性状は間隙の寸法によって異なる。
- 3) 骨材は間隙通過後、ある程度離れた位置で速度が元の安定した状態に戻る。
- 4) 間隙通過後に骨材の流動速度が安定する位置を基準とした想定区間における骨材の平均速度から、コンクリートの打込み時の流動挙動を予測することができ、配筋設計などに役立てることができる。

参考文献

- [1]吳 相均、野口貴文、友澤史紀：高流動コンクリートの間隙通過時のレオロジー定数評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol18、No1、pp459-464、1996
- [2]橋本親典、丸山久一、清水敬二：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞課程の可視化に関する実験手法、コンクリート工学、Vol126、No2、pp119-127、1988
- [3]橋本親典、丸山久一、清水敬二：テーパ管を流動する可視化モデルコンクリートの乱れ計測システム、土木学会論文集、第402号、V-10、pp61-70、1989
- [4]谷川恭雄、森 博嗣、黒川善幸：超流動コンクリートにおける粗骨材連行性に関するレオロジー的考察、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp79-84、1993.5